

# 三相感应电动机的新型微机直接转矩控制系统

李 锋

(茂名学院物理系 广东 525000)

随着电力电子学和微机的发展,变频变压交流电动机传动系统在很多工业部门中的应用日益增加,而这些新的应用需要简单的控制交流电动机的方法。众所周知,交流电动机的速度控制,因其与电压、频率和转矩控制有关,而比直流电动机的速度控制困难。尽管应用矢量控制理论能实现交流电动机高性能速度控制,但所得到的控制器对于较大范围的应用来说太复杂。控制方法的改进(及替代矢量变换)应保持直接转矩控制的特点。转矩控制也组成多种速度和位置控制器的内环。1977年,普伦基特提出了 PWM 逆变器感应电动机传动系统的直接磁通和转矩控制方法,其优点是直接连接了主磁通和转矩,但是要测量瞬时主磁通是不方便的。

1981年,Yamamura 开发了交流电动机速度控制的磁场加速法(FAM)。FAM的关键是气隙磁场需维持恒幅,而磁场的旋转速度可调,直到得到所需的转矩值。当气隙磁通保持常数时,所有其他变量,例如电压、电流和转矩均仅为转差的函数。通过对气隙磁通旋转的加速或减速选择滑差频率,转矩就能按要求控制。

另一方面,研究 PWM 逆变器感应电动机传动系统的各种分析方法,“瞬时空间矢量”一词在电力电子的各种文章中经常出现,并作为分析 PWM 逆变器感应电动机传动系统的一种工具,采用瞬时空间矢量理论,可以计算主瞬时磁通,并且使其近似保持恒定,由于实现了气隙磁通的快速加、减速旋转,因而可以得到快速转矩响应控制。直接转矩控制方法在感应电动机调速传动系统中愈来愈受欢迎。

本文介绍一种三相感应电动机新型微机直接转矩控制系统。瞬时空间电压矢量积分值的轨迹,有利于理解主磁通运动及其计算。控制算法可由 1K-ROM 存储器在线实现。所以,控制器非常紧凑,并

且非常容易由硬件和软件实现。用 16 位微机实现全数字 PWM 逆变器感应电动机传动控制器,实验结果与理论是一致的。

## 工作原理

### 1. PWM 逆变器感应电动机传动系统的瞬时空间电压矢量

瞬时空间电压矢量的概念并不是新东西,它与 1920 年出现的 Park 矢量相同。直到最近,它才应用于交流电动机传动系统。其基本思想概述如下:

(1) 为将三相量作为一整体处理,可用瞬时空间电压矢量  $V$  和瞬时空间电流矢量  $I_1$  分别表示三相电机的电压和电流,即

$$V_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ v_a - v_b \exp\left(j \frac{2\pi}{3}\right) + v_c \exp\left(j \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (1)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ i_a + i_b \exp\left(j \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \exp\left(j \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (2)$$

式中  $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$  为原边相电压的瞬时值,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为原边相电流的瞬时值。

(2) 图 1 为 PWM 逆变器感应电动机的原理图,图中  $S_a$ 、 $S_b$  和  $S_c$  为开关元件,当开关接正电压时,其值为 1;当开关接负电压时,其值为零。PWM 逆变器的瞬时空间电压矢量由开关元件  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  的状态决定,采用开关元件时,感应电动机的主空间电压矢量  $V_1(S_a, S_b, S_c)$  可表示为:

$$V_1(S_a, S_b, S_c) = \sqrt{\frac{2}{3}} V \left[ S_a + S_b \exp\left(j \frac{2\pi}{3}\right) + S_c \exp\left(j \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (3)$$

式中  $V$  为 PWM 逆变器的直流电压。

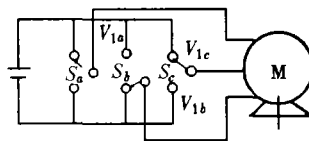


图 1 PWM 逆变器感应电动机传动系统

(3) 根据开关模式的组合,主空间电压矢量  $V_1$  ( $S_a, S_b, S_c$ )可规定为 8 种矢量,其中两种为空间零电压矢量  $V_1(1,1,1)$ 和  $V_1(0,0,0)$ ,其他为空间非零电压矢量,即  $V_1(1,0,0), \dots, V_1(0,1,1)$ ;如图 2 所示。

(4) 感应电动机的主空间磁通矢量可用下式计算:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \int [V_1(S_a, S_b, S_c) - RI_1] dt \\ &= V_1(S_a, S_b, S_c)\Delta t - \int RI_1 dt + \psi_0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\psi_0$ —— $t = c$  时的主磁通矢量,

$I_1$ ——主空间电流矢量,

$R$ ——主绕组相电阻,

$\Delta t$ —— $V_1(S_a, S_b, S_c)$  的时宽。

设主绕组电阻的电压降较小,则  $\psi_1$  沿  $V_1(S_a, S_b, S_c)$  方向运动。 $\psi_1$  的速度正比于  $V_1(S_a, S_b, S_c)$  的值。这意味着对感应电动机采用空间非零电压矢量,则  $\psi_1$  的运动方向和幅值会变化,而对感应电动机采用零电压矢量,则  $\psi_1$  的运动将受到抑制。因此,利用适当选择 6 个空间非零电压矢量及其时宽,  $\psi_1$  的轨迹跟踪规定的轨迹。同理,在两个空间非零电压矢量间插入一个或多个空间零电压矢量就能调节  $\psi_1$  的旋转速度。

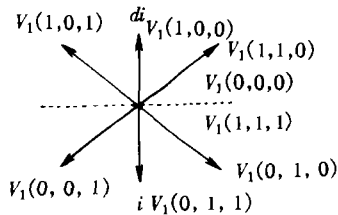


图 2 主空间电压矢量

## 2. 感应电动机的直接主磁通控制

为获得交流电动机高性能速度控制,除弱磁运行外需要尽可能保持气隙磁通恒定。详细研究表明,交流电动机调速性能差不在于交流电动机本身,而在于交流电源。在正弦交流电源的情况下,主磁通的轨迹为平滑的圆周,但是,大多数由电子逆变器构成的电源并不是纯正弦的。因而在调速运行,特别是在低速运行时,气隙磁通很难保持恒定。瞬时空间矢量理论使跟踪主磁通成为可能,并使主磁通在整个速度范围内几乎保持恒定。

平滑圆周可用等边多边形近似。事实上,只要增加多边形的边数,误差就能小到所需的程度。对

于给定平滑圆周的主磁通轨迹,有几种近似平滑圆周的模式,但最好是转折轨迹对称,并用微机实现。图 3 为用等 12 边多边形(每边相应于主磁通矢量)近似平滑圆周的图示。

图 3 清楚说明,12 个空间磁通矢量有 6 个输出的方向与相应的空间非零电压矢量的方向相同,称之为实磁通矢量。另一方面,12 个空间磁通矢量的另 6 个输出与空间非零电压矢量的方向不同,称之为伪磁通矢量。因此,空间非零电压矢量可以编排次序,以跟随规定时宽的实磁通矢量。可根据图 4 计算时宽,并表示如下:

$$T_r = \sqrt{6} \psi_m \tan 15^\circ / V \quad (5)$$

式中  $V$ ——PWM 逆变器直流环节电压(V)

$\psi_m$ ——主磁通额定幅值(mWb)

在下述情况下,伪磁通矢量必须与空间非零电压矢量同步。

(1) 每一伪磁通矢量可占用 2 个和只有 2 个空间非零电压矢量和 1 个或多个空间零电压矢量。

(2) 这 2 个空间非零电压矢量的同步轨迹的旋转方向与实磁通矢量的相同。

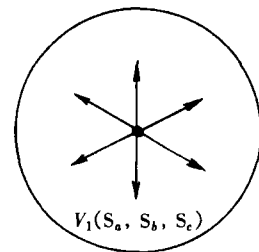


图 3 主磁通矢量

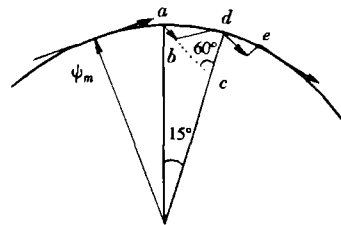


图 4 伪矢量的综合

值得注意的是,最后的目的是跟踪伪磁通矢量,而是跟踪平滑圆周的弧。由图 4 可以看出,如时宽转短,主磁通幅值较小。另一方面,时宽较长,微机将很容易完成控制程序。作为一种折衷方案,每一伪磁通矢量可选 4 条轨迹,并且这 4 条轨迹对称于伪磁通矢量的中心。设  $T_{ab} = \frac{1}{2} T_{bc}$ , 如图 4 所示,这些磁通矢量的时宽可计算如下:

$$T_{ab} = \frac{\sqrt{2}\psi_m \tan 15^\circ}{3V} \quad (6)$$

$$T_{bc} = T_{bd} = \frac{2\sqrt{2}\psi_m \tan 15^\circ}{3V} \quad (7)$$

式中,  $V, \psi_m$  的定义同式(5)。主磁通幅值的波动范围可达到额定值的96%—104%。

对于数字控制技术来说,可以构成分别存贮空间非零电压矢量和其时宽的两种表格,由控制程序存取选定的电压矢量和时宽。值得注意的是,采用同样的两种表格,利用缩短非零电压矢量时宽也可实现弱磁运行。但是,必须保证时宽足够长,以便微机在可用的时间内完成圆周。

### 3. 主磁通恒定时的直接转矩控制

可以看出,瞬时滑差角频率的阶跃变化可以获得快速转矩响应控制。对于转速恒定情况,主磁通频率的阶跃变化可引起瞬时滑差角频率的阶跃变化。如上所述,主磁通的旋转速度与直流环节的电压成比例,而主磁通的旋转方向由非零空间电压矢量决定。如果仅用零空间电压矢量,主磁通将停止运动。因此,通过选择1个空间非零或零电压矢量和选择规定的时宽,则可实现直接转矩控制。改变零空间电压矢量数和非零空间电压矢量数的比值,就能调节滑差角频率。

在转矩闭环控制的情况下,如图5所示,  $V_1(S_a, S_b, S_c)$  的选择不仅决定于电动机转矩  $T$  和转矩指令  $T^*$  间的有效期,也决定于主磁通的方向。而主磁通的方向,可通过查找非零空间电压矢量表指示器的内容求得。因而,选择  $V_1(S_a, S_b, S_c)$  变得非常简单。例如,当转矩指令  $T^*$  增加,电动机转矩  $T^*$  变得小于其指令时,则控制器非常迅速地接通一

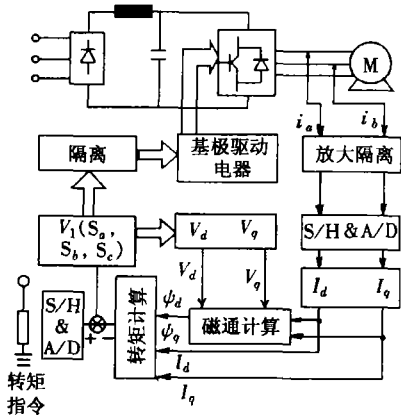


图5 PWM逆变器感应电动机传动系统微机控制方框图

个由非零空间电压矢量指示器寻址的非零空间电压矢量。另一方面,减小电动机的转矩  $T$  会大于相应的转矩指令  $T^*$ ,那末,为减小逆变器的开关频率,切换到空间零电压矢量就可获得最好的减速运行。使逆变器每相的开关频率最小很重要。由于有两种空间零电压矢量,所以要用同一种方法(即只接通逆变器一相实现由一种状态到下一状态的转换)来选择空间零电压矢量。在微机控制系统中,利用规定程序实现这种运行。

三相感应电动机新型微机直接转矩控制系统,由16位个人计算机实现。该电动机能由零速至主范围内连续运行。瞬时主磁通可用计算机软件计算,因此可以非常简单地获得数据。通过选择空间非零电压矢量和其时宽,能控制主磁通的幅值。因此,分别实现了磁通和转矩的控制。

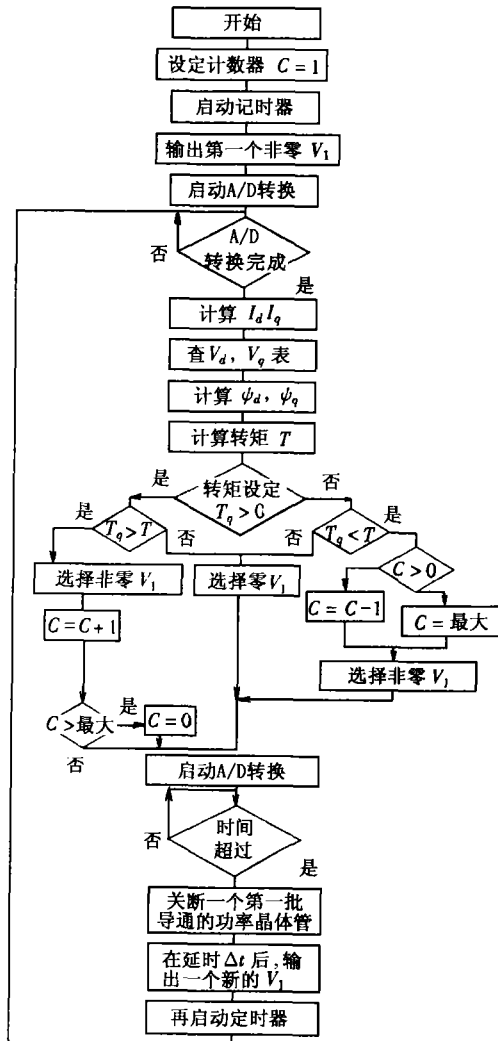


图6 控制程序流程图